

# 레이저 다이오드를 이용한 이진 신호누적 방식의 거리측정기 기술

A DLRF(Diode Laser Range Finder) Using the Cumulative Binary  
Detection Algorithm

양 동 원\*  
Yang, Dong-Won

## ABSTRACT

In this paper, a new design technique on the LRF which is useful for low power laser and a CBDA (Cumulative Binary Detection Algorithm) is proposed. The LD(Laser Diode) and Si-APD(Silicon Avalanche Photo Diode) are used for saving a power. In order to prove the detection range, the Si-APD binary data are accumulated before the range computation and the range finding algorithm. A prototype of the proposed DLRF(Diode Laser Range Finder) system was made and tested. An experimental result shows that the DLRF system have the same detection range using a less power(almost 1/32) than an usual military LRF. The proposed DLRF can be applied to the Unmanned Vehicles, Robot and Future Combat System of a tiny size and a low power LRF.

주요기술용어(주제어) : LRF(레이저 거리측정기), CBDA(이진누적 알고리즘), Laser Diode(레이저 다이오드), DLRF(다이오드 레이저 거리측정기)

## 1. 머리말

군사용 거리측정기는 원거리에 위치하는 목표물의 거리를 정확하게 측정하기 위하여 일반적으로 고출력의 레이저를 사용한다. 이 때 사용되는 레이저는 대체로 수십 Mega Watt의 첨두출력을 지닌 펄스 레이저를 사용하게 된다. 한 펄스로 발사된 고출력 레이저는 목표물에 반사되어 돌아오고 수신부 회로는 그

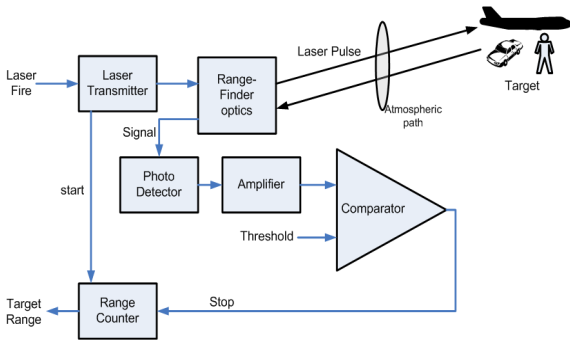
신호를 검출하여 목표물이 떨어진 위치를 계산하게 된다(그림 1 참조). 이 때 돌아오는 신호의 크기는 SNR을 고려하여 일정한 크기 이상이 되어야 하고, 대기 투과에 의한 손실을 고려하여 출력되는 레이저 세기를 설정하게 된다.

기존의 군사용 거리측정기<sup>1~4)</sup>는 고출력 레이저를 사용해야 하며 그 전력을 충당하기 위한 전원 회로 및 대용량의 축전지등이 필요하다. 그러나 미래의 군사 기술은 점차 소형화 및 경량화된 거리측정기를 요구하고 있으며, 배터리로만 운용되는 무기체계는 저전력의 요구조건을 갖게 된다. 따라서 기존의 거리측정 방식을 탈피한 새로운 방법이 요구되었다.

† 2007년 4월 1일 접수~2007년 8월 23일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : dongwoni@add.re.kr



[그림 1] 일반적인 레이저 거리측정 시스템 개략도

본 연구 논문에서는 기존의 고체 레이저에 비해서 레이저 출력과 그 크기가 현저히 작은 LD(Laser Diode)를 이용한 거리측정 기술을 소개한다. 본 기술에서는 905nm 파장 대역의 반도체 레이저를 사용하였으며, 최대 측정거리에서는 주변의 잡음 신호와 같은 nW 수준이 되도록 출력을 최소화 설계 하였다. 저출력 설계로도 거리측정 성능 확보를 위하여 이진 누적 알고리즘(Cumulative Binary Detection Algorithm)을 이용한 거리 검출 기술을 구현하였다. 이진 누적 알고리즘은 기존의 1회의 펄스를 이용한 거리측정 방식과는 다르게 N회의 누적을 통해서 거리를 검출하는 방식이다.

기존의 거리측정 장치는 계수기(timer)를 이용하여 한 번의 레이저 펄스가 수신되는 시간을 계산하여 거리 정보를 획득하였다. 이 때 수신되는 신호를 구별하기 위해서는 신호의 SNR이 일정 크기 이상을 보장해야 한다. 반면 제안하는 기술에서는 저출력 레이저를 사용해서 SNR이 거의 1에 가까운 레이저 신호가 들어온다. 본 연구에서는 SNR을 증가시키기 위하여 N회 누적 처리하였으며 실제 환경에서의 잡음 신호는 백색잡음의 형태를 나타내기 때문에 무한 누적 처리를 할 경우 이론적으로 완전한 제거가 가능하다. 표적 신호는 누적되는 과정에서 그 크기가 커지는 반면 잡음은 그 크기가 계속 작아져서 미약한 신호도 검출이 가능하게 된다. 이 기술 개발을 통하여 LD 적용시 발생하는 저출력 문제를 극복하였고 원거리 측정이 가능해졌다.

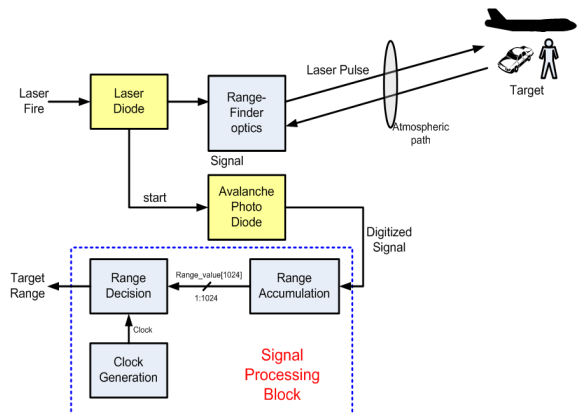
수신부에서는 Si-APD(Silicon Avalanche Photo Diode)를 사용하여 구현하였으며 광학계와 pre-amp

및 신호처리 회로가 hybrid 형태로 설계/구현 되었다. 전원은 배터리로부터 3.2V 수준의 전압을 공급받아도 안정적으로 동작 가능하도록 설계하였다.

본 논문의 2장에서는 제안하는 레이저 거리측정 기의 HW 구조에 대해서 서술하였고, 3장에서는 이진 누적 알고리즘에 대한 이론적 배경 및 효과에 대해서 살펴본다. 4장에서는 제안하는 기술의 실효성 입증 실험 결과 및 이론적 예측치와의 비교결과를 나타내었고, 5장에는 맺음말을 나타내었다.

## 2. 거리측정기 HW

먼저 LD/APD를 이용한 거리측정 시스템의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다. 그림 1의 일반적인 거리측정기와의 차이점은 LD/APD를 사용한 점과 전체 구성상 신호처리 부분에서 거리 누적 및 거리 결정 부분이 추가 되어 있다는 점이다. APD에서는 실시간으로 레이저 수신 신호를 디지털 신호로 변환해주고 있으며, 신호처리부에서는 이진화된 신호를 누적하게 된다. 누적된 신호를 거리결정 알고리즘에서 분석하여 최종 거리를 결정하게 된다.

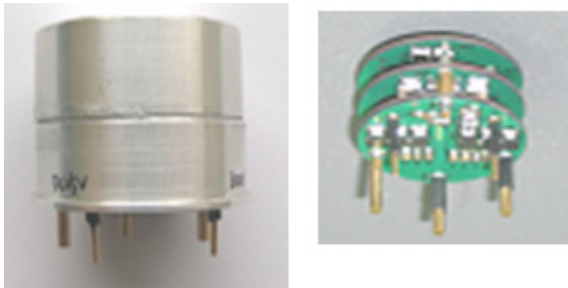


[그림 2] LD/APD 이용 거리측정기 전체 구성

### 가. 레이저 송신부(Laser Transmitter)

레이저 송신부는 주어진 레이저 신호에 따라 N회의 레이저 펄스를 발사해 주는 역할을 한다. 기존의 고체 레이저나 고출력 레이저의 경우 일정 시간의 전

류 충전 시간이 필요해서 연속적인 동작을 제한 받아 왔다. 그러나 이 연구에 사용된 LD(Laser Diode)의 경우 저출력 에너지를 사용하기 때문에 충전 시간이 불필요 하여 연속 발사가 가능하다. LD 모듈에는 레이저 출력을 위한 고전압 처리 부분, 고전압에서 회로를 보호해주기 위한 보호회로와 축전지로 설계하였다. 이 모든 회로와 광학 소자들이 하나의 캔 형태로 하이브리드 설계가 되었으며, 사용시스템에 맞게 형상 변경이 가능한 장점이 있다. 그림 3에 제작한 LD의 형상을 나타내었고, 표 1에 LD의 상세 규격<sup>[5]</sup>을 나타내었다.



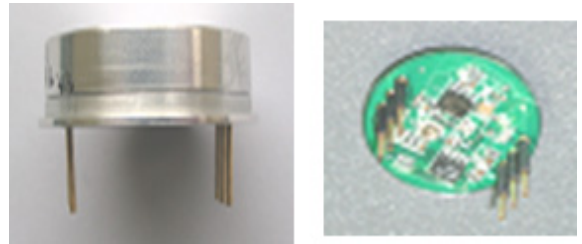
[그림 3] LD 모듈 형상

[표 1] Laser Diode 상세 특성

LD(Laser Diode)	
Part Number	PGAS3S09
Wavelength	905nm
TYP POWER	53.0W 23℃, 150ns(pulse width)
# of Elements	3
Emitting Area	230 × 225 $\mu$ m
beam divergence for single elements	25°
Maximum peak Forward current	22A
series resistance	0.217 $\Omega$
package options	C, F, R, S, U, Y
Operating Temperature	-55℃ ~ +85℃
Storage Temperature	-55℃ ~ +100℃

#### 나. 레이저 수신부(Laser Receiver)

레이저 수신부는 표적을 맞고 수신되는 레이저 신호를 검출 및 이진화 처리하여 신호처리부로 전송하는 역할을 한다. 기존의 고체 레이저나 고출력 레이저의 경우 하나의 레이저 펄스가 검출 될 때까지의 시간을 카운트 하여 거리를 검출했던 방식과 다르게 N회의 펄스를 효과적으로 누적 할 수 있도록 증폭기 및 미분기, 이진화 회로를 하이브리드 설계하여 구현하였다. 이때 사용된 APD는 900nm대역의 신호를 검출하기에 적합한 모델을 사용하였고 제작된 APD 모듈의 상세 형상을 그림 4에 나타내었고, APD의 특성<sup>[6]</sup>을 표 2에 나타내었다.



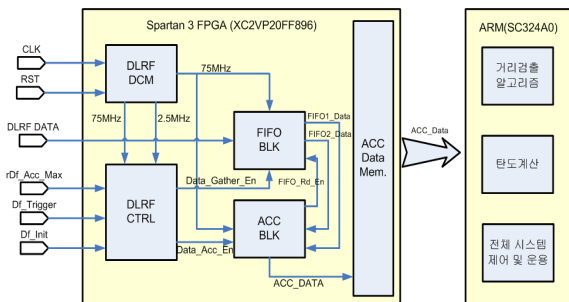
[그림 4] APD 모듈 형상

[표 2] Avalanche Photo Diode 상세 특성

APD(Avalanche Photo Diode)	
Part Number	C30902S
useful area	0.2mm <sup>2</sup>
useful diameter	0.5mm
Breakdown voltage	225V
Responsivity(900nm)	108A/W
Quantum(900nm)	60%
Dark Current	1 × 10e-8A
Noise Current	1.1 × 10e-13A/Hz(e1/2)
Rise time	0.5ns
Fall time	0.5ns
Operating Temperature	-40℃ ~ +70℃
Storage Temperature	-60℃ ~ +100℃

다. 레이저 신호처리부

거리측정을 위한 신호처리부는 레이저 수신부로부터 받은 이진화 신호를 누적하여 거리검출 알고리즘부로 전송하여 주는 역할을 한다. 신호처리부는 누적 계산을 위해서 FPGA(Field Programmable Gate Array)가 사용되었으며, 거리검출 알고리즘은 별도의 프로세서(ARM : Advanced RISC Machine)에서 처리한다. 상세 블록도를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 DLRF DCM 블록은 main clock으로부터 75 MHz와 2.5MHz의 clock을 생성해 내게 되며 DLRF CTRL 블록은 각 상태에 따라서 거리 획득과 누적을 제어하게 된다. 이때 획득된 데이터는 FIFO 블록과 ACC블록을 거쳐서 최종적으로 ARM으로 전달되게 된다. ARM에서는 다음 장에서 논의 될 거리검출 알고리즘을 통해서 거리를 검출하게 된다.



[그림 5] FPGA 내부 신호처리 블록 및 인터페이스

3. 거리계산 SW

일반적인 APD 신호처리 회로는 검출된 레이저 수신 신호를 아날로그 방식으로 증폭하여 출력한다. 그 결과 그 신호는 입력전력에 비례하는 값으로 나타나게 된다. 그러나 본 연구에 쓰인 APD는 analog와 digital 부분이 혼용된 hybrid 방식으로, 증폭된 analog 신호를 문턱값(threshold)과 비교하여 digital 이진 값(0/1)으로 출력하게 된다. 따라서 신호처리부에서는 이진화 데이터를 고속으로 누적하게 되며, 그 누적 결과를 이용하여 거리검출 알고리즘이 수행된다. 이 장에서는 이진화된 데이터의 누적이 따른 효과를 이론적으로 분석해 보고 누적신호를 이용한 거

리검출 알고리즘에 대해서 알아보자.

가. 이진누적 알고리즘의 이론적 배경

고안된 이진 누적 알고리즘으로 신호대 잡음비를 증가시켜 거리 획득을 하기 위해서는 다음의 가정이 성립되어야 한다.

- 신호와 잡음은 비상관성을 갖는다
- 잡음은 정규분포를 따르고 평균은 0이다.

평균이 0인 정규분포 잡음을 영전압 검출기를 통해 +전압은 1, -전압은 0으로 N번 검출하여 누적하면, 누적된 잡음분포의 평균은 0.5N이 되고 표준편차는  $0.5\sqrt{N}$ 이 된다. 한편, 정규분포잡음에 신호가 중첩되면 확률분포가 신호의 크기만큼 평행 이동하므로, N번 누적된 누적확률분포의 평균은 pN이 되고 표준편차는  $\sqrt{p(1-p)N}$ 이 되며, 신호대 잡음비는  $\sqrt{N}$  배만큼 향상된다. 여기서, p는 신호가 존재할 때 영전압 검출기의 출력이 1일 확률이다.

따라서, 누적이진 검출알고리즘에서의 검출확률  $P_D$ 는 오경보율, 문턱대잡음비 및 신호대잡음비로 아래 식과 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$FAR = N_s \int_{L_T}^{\infty} \frac{1}{0.5\sqrt{N}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.5N)^2}{0.5N}} dx$$

$$FAR = N_s \left( 0.5 - \int_0^{TNR} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right) \tag{1}$$

$$P_D = \int_{L_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{p(1-p)N}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-pN)^2}{2p(1-p)N}} dx$$

$$P_D = 0.5 + \int_0^{\frac{SNR(N)-TNR}{\sqrt{2\pi}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \tag{2}$$

$FAR$  = 오경보율(False Alarm Rate)

$N_s$  = 거리측정샘플수 = 최대측정거리/거리측정분해능

$N$  = 누적회수

$L_T$  = 문턱값 =  $0.5\sqrt{N}TNR + 0.5N$

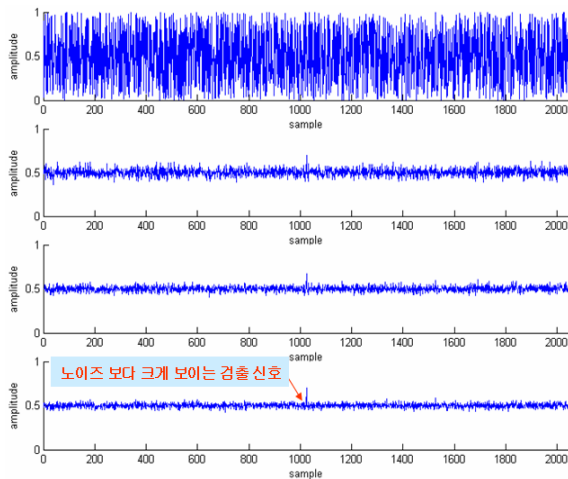
$TNR$  = 문턱대잡음비(Threshold-to-Noise Ratio)

$$SNR(N) = N \text{회 누적시의 신호대잡음비}$$

$$= \sqrt{N} SNR(1)$$

$$SNR(1) = \text{시스템의 신호대잡음비}$$

위 수식 (1), (2)으로 표현된 이진누적 검출 알고리즘의 효과를 설계 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 먼저, 설계사양으로 FAR(오경보율) 0.1% 이하,  $P_D$  (검출확률) 99.9% 이상, 최대측정거리 3000m, 거리측정분해능 1m, 누적회수 1024회가 주어졌다 가정하면,  $N_S$ 의 정의로부터  $N_S=3000$ 이고 식 (1)을 이용하여 TNR(문턱대 잡음비)를 5로 설정 할 수 있다. TNR이 결정되었으므로,  $L_T=592$ 가 된다. 이 값을 식 (2)에 넣고 계산하면  $SNR(1024)=8.1$ 이 되고  $SNR(1)=0.253$ 이 된다. 이 결과는 종래의 거리측정기에 사용되고 있는 레이저의 1/32 이하의 출력으로도 동일한 거리측정 능력을 갖는 시스템을 구현할 수 있음을 의미한다. 실제 예를 들어 다음 그림 6을 보자. 먼저 제일 위의 그림은 1회 데이터 획득시의 검출 신호이다. 노이즈와 거의 비슷한 신호가 1024번째 sample에 들어왔다. 그러나 노이즈와 신호가 구별되지 않는다. 다음 그림에는 누적 횟수를 50회씩 증가해가며 150회까지의 누적 결과를 나타내었다. 이때 1회 측정 시에는 노이즈와 구별이 되지 않지만 50회 100회 150회 누적을 거듭하면서 점점 노이즈는 평균화 되고 검출신호는 나타나게 된다. 누적을 하게 되면 SNR(신호대



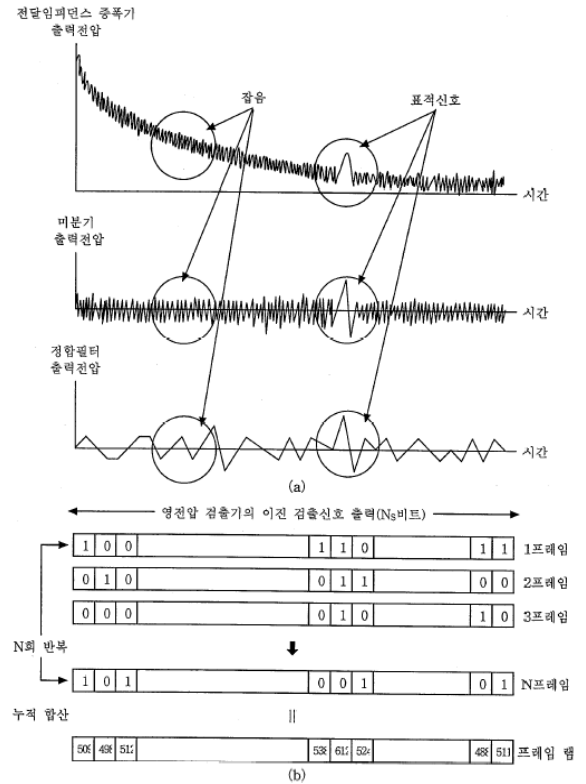
[그림 6] 이진 누적의 효과

잡음비)이 증가하여 작은 출력의 신호로도 먼 거리를 검출 할 수 있게 된다.

나. 누적 신호를 이용한 거리검출 알고리즘

Si-APD에서 수신된 신호가 누적되는 과정을 그림 7에 나타내었다. 레이저 신호는 거리에 따라서 지수 함수에 맞게 감소하여 잡음과 함께 들어온다. 이때 표적 신호를 검출하기 위하여 증폭 및 미분과정을 거치고 정합필터를 거쳐서 영전압 검출을 통한 이진화를 수행한다. 그 결과를 N회의 반복 수행을 통해서 거리별로 누적 합산 된 데이터를 저장하게 된다.

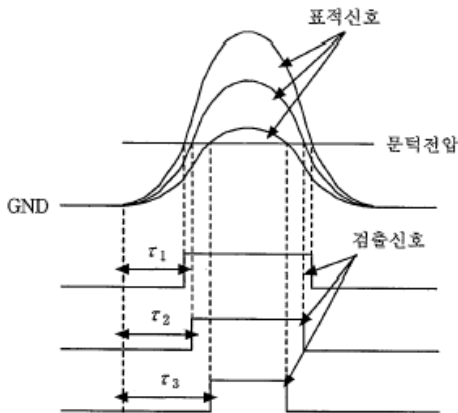
최초로 누적된 신호는 잡음이 많이 섞여 있어 신호처리를 하기 위해서는 Moving Average 과정을 거쳐 신호의 잡음을 감소시켜준다. 노이즈는 그 변화량이 크지 않은 반면 신호는 주변의 변화보다 큰 변화를 보이고 있다. 따라서 미분을 통하여 누적된 데이터의 변이가 가장 큰 점을 검출 거리로 찾아내게 된



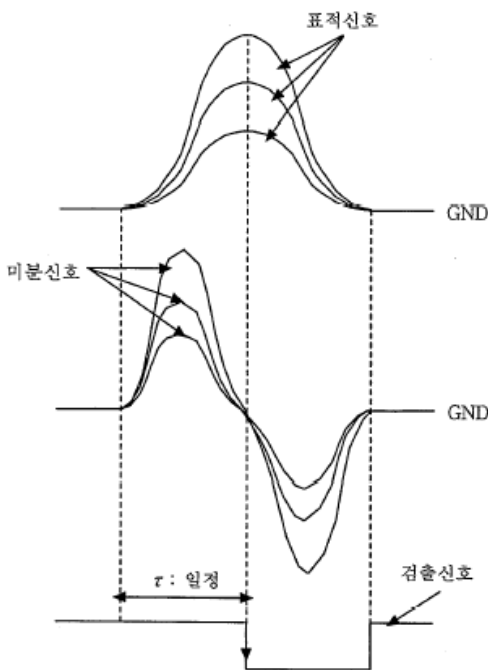
[그림 7] 이진 누적 신호처리 방식

다. 거리 계산 알고리즘의 세부 과정을 요약하면 다음과 같다.

- Moving average를 이용한 잡음제거
- 미분
- 지역최대값 sorting
- 전역최대값 sorting



[그림 8] 표적신호 크기에 따른 검출신호 변화



[그림 9] 표적신호 변화에 따른 미분신호 변화

그림 8, 9는 신호누적으로 인해서 표적신호가 검출되는 폭이 커지는 효과와 그 미분 신호의 변화를 나타내었다. 따라서 잡음보다도 작은 크기의 레이저 반사광이 수신되더라도 이진누진 알고리즘을 이용하면 신호크기를 크게 할 수 있기 때문에 거리 검출이 가능하다.

#### 4. 거리측정기 시험 결과

가. 이진 누적 효과 예측 모의 결과  
레이저 거리방정식은 다음의 식과 같다.

$$P_r = \frac{P_t}{R^2 \Omega_T(\theta)} \rho A_T(R) \frac{A_R}{R^2 \Omega_r} T_{sys} \eta_{atm} \quad (3)$$

$P_r$  : 수광검출된 광의 세기(W)

$P_t$  : 레이저의 첨두출력(W)

$\rho$  : 표적의 반사율

$A_T(R)$  : 표적크기

$A_R = \frac{\pi D^2}{4}$  : 수광 대물렌즈 면적

D : 대물렌즈 직경

$\Omega_T(\theta) = \frac{\pi \theta^2}{4}$

$\theta$  : 레이저 발산각(rad)

$\Omega_r = \pi$  (Lambertian 반사)

$\eta_{atm} = \exp(-2\alpha R)$

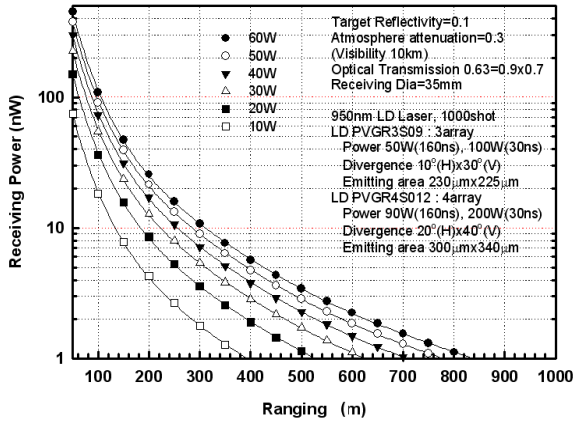
R : 측정거리(m)

레이저광의 발산 면적보다 표적크기가 큰 지상표적의 경우 거리방정식은 다음의 식과 같다.

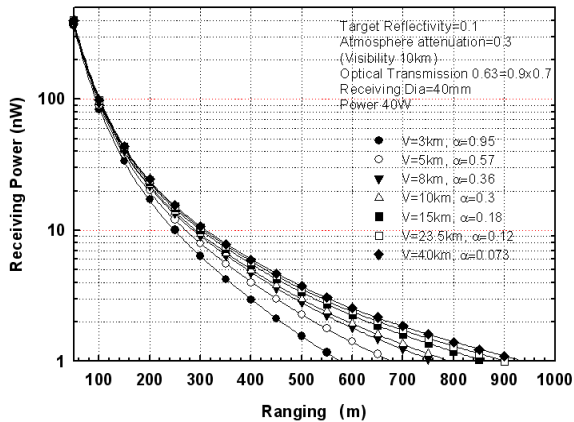
$$P_r = \frac{P_t \rho D^2}{4 R^2} T_{sys} \eta_{atm} \quad (4)$$

수광된 검출광  $P_r$ 이 최소검출신호(MDS, Minimum Detectable Signal)보다 클 때 거리측정이 가능하다. 최소검출신호(MDS)는  $SNR \times NEP$ 로 Si-APD(검

출 유효직경 500 $\mu$ m) 검출기는 약 1nW를 설정하여 분석하였다. 그림 10~11에 있는 분석 결과 아주 낮은 출력의 거리측정기로도 누적의 효과로 원거리 거리 검출이 가능함을 확인 할 수 있다.



[그림 10] LD-LRF 출력에 따른 최대 거리측정 분석 (수광 직경 35mm)



[그림 11] 레이저 파장의 대기 투과계수에 따른 거리 측정 분석

#### 나. 실 거리측정 시험 결과

실제 거리 측정 성능이 이진 누적 알고리즘을 통하여 개선되는 것을 확인하기 위해서 일반적으로 사용되는 군용 LRF 장비와 제작 장비의 성능을 비교하여 시험하였으며, 측정의 정확치를 고려하기 위하여 기선장\*을 이용하여 시험하였다. 시험 결과는 다음의

표 3과 같다.

[표 3] 거리측정 실험 결과(기선장)

구분	기선장 거리(m)	DLRF	군용 LRF(m)
측정1	0	0	0
측정2	39	39	39
측정3	138	138	137
측정4	296	296	295
측정5	425	425	424

표적의 거리측정 결과는 기선장과 동일한 거리를 나타내고 있으며 기선장의 오차 범위는 0.39mm 수준이므로 정확한 거리측정이 되고 있음을 알 수 있다. 시험에는 20W의 침투 출력을 갖는 LD를 이용하였고, 누적 횟수는 1000회를 수행하였다. 거리성능은 425m의 거리를 측정하였으며 표에 나타난 시료는 20번 측정하여 1회의 오차도 검출되지 않았다. 이 결과는 일반 군용 LRF보다 약 1/32의 출력의 LD를 이용하더라도 누적 알고리즘을 이용해 동일 성능 이상의 효과를 거둘 수 있음을 나타낸 것이며, 위에서 분석한 누적의 이론적 효과 및 예측치와 정확하게 일치함을 볼 수 있다.

## 5. 맺음말

본 논문에서는 기존의 고출력 레이저를 이용한 군사용 거리측정기가 가지고 있는 크기, 무게, 전력등의 단점을 극복하기 위해서 소출력 레이저 다이오드를 이용한 거리검출 기법을 제안 및 구현하였으며, 시험을 통해서 그 기능을 입증하였다. 저출력으로 인한 거리검출 성능의 저하는 새로운 이진 누적 방식을 고안해서 구현함으로 극복하였으며, 이론적인 검증과 실제 시험에 의한 검증도 완료 되었다. 제안된 기술은 향후 개발되는 국방로봇 및 무인화 장비뿐만 아니라

\* 기선장은 국토지리원에서 지정한 오차  $\pm 0.39$ mm 수준의 수원 성균관대 기선장을 사용하였다.

저전력이 요구되는 배터리를 이용한 휴대용 장비에 응용 될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김재기, 전용근, 최영수 외 4, “3세대 라만 레이저 거리측정기 개발”, 국방과학연구소, KTRC-517-000457, 2000. 4.
- [2] 박용찬, “거리획득 신호처리기 설계”, 국방과학연구소, CESD-509-970618, 1997. 6.
- [3] 박용찬, 최영수, 김현규, 임정수, 강응철, “고반복 Nd:YAG 레이저 거리측정기 설계”, 국방과학연구소, ATRC-420-940221, 1994.
- [4] 박용찬, 최영수, 강응철, 김재기, “고반복 거리측정기용 Nd:YAG 레이저 발진기 설계 및 제작”, 국방과학연구소, ATRC-420-92710, 1992.
- [5] DataSheet, “905nm Multi-Quantum Well Strained InGaAs Pulsed Laser Diodes”, Perkin-Elmer.
- [6] DataSheet, “Silicon Avalanche Photodiodes C30902E, C30902S, C30921E, C30921S”, Perkin-Elmer.
- [7] Alberto Leon Garcia, “Probability and Random Process for Electrical Engineering”, 2nd Edition, Addison Wesley